

◆특집◆ Eco-Machining

압축냉각공기를 이용한 환경친화적 연삭 가공기술

최헌종\*, 이석우\*\*

Environmental Friendly Machining Process Technology  
Using Compressed Cold Air

Hon Zong Choi\*, Seok Woo Lee\*\*

**Key Words :** Environmental problem(환경문제), Coolant(연삭유), Dry grinding(건식연삭), Cooling effect(냉각효과), Compressed cold air(압축냉각공기), Mist(미스트), Residual stress(잔류응력) Grinding force(연삭력), Surface integrity(표면품질),

1. 서론

최근 들어 오존층의 파괴, 지구 온난화 등 지구 전체에 환경문제가 크게 대두되면서 환경친화적 가공 기술인 Eco-Machining 기술에 대하여 많은 연구개발과 실용화가 진행되고 있다. 전 세계적으로 Green Round, ISO14000 등과 같은 선진국의 환경보호정책에 의해 작업 환경에 관한 규제가 강화됨에 따라 제품이 생산되는 단계, 즉 제조단계에서의 환경에의 대응이 이미 10여년 전부터 독일과 일본에서 연구되고 실용화 되고 있다. 또한, 에너지 소비를 줄이기 위한 공작기계와 주변장치 개발 및 이송계에 공급되는 윤활유에 의한 환경오염을 줄이기 위한 환경 친화적 공작기계뿐만 아니라 환경 친화적 연삭유의 개발 및 연삭유의 처리 기술의 개발에 의한 연삭유 사용 수명의 증가 기술 등과 같은 연삭유에 의한 환경오염을 줄이기 위한 연구도 많이 진행되고 있다.<sup>(1,2,3)</sup>

- 절삭유 연구분야
  - 생물에 무해한 대체 연삭유의 개발
  - 연삭유의 리사이클링 기술 개발
  - 연삭유의 수명 연장을 위한 장치 개발
- 가공기술 분야
  - 세미 드라이 가공(semi-dry machining) 기술
  - 극미량(수십 ml/시간) 절삭액 공급장치 개발
  - 드라이 가공(dry machining) 기술의 확립
  - 압축냉각공기를 이용한 냉풍가공 기술 개발.

제품이 생산되는 가공 공정에 있어서 가장 문제가 되는 것이 가공에 사용되는 연삭유에 의한 작업장의 환경 오염 및 폐유의 처리 문제 등이라 할 수 있는데 이러한 문제점들을 해결하기 위한 환경 친화적인 가공법으로 먼저 개발된 것이 연삭유를 종래와 같이 다량으로 사용하지 않거나 극미량만을 사용하는 드라이 가공, 세미 드라이가공 기술이라 할 수 있다.

연삭유는 가공 시 공중으로 분진화 되어서 작업장의 공기를 심하게 오염시키며 특히, 윤활성능을 향상시키기 위해 넣어주는 염소(Cl), 인(P), 황(S) 등과 같은 극압 첨가제는 작업자의 질병을 유발시킬 뿐만 아니라 폐액의 최종 처리인 소각에 의해 발암성 물질인 다이옥신도 발생시킨다. 또한

\* 한국생산기술연구원 첨단생산설비연구팀

Tel. 041-5898-281, Fax. 041-5898-260

E-mail: hzchoi@kitech.re.kr

\*\* 한국생산기술연구원 첨단생산설비연구팀

Tel. 041-5898-424, Fax. 041-5898-260

E-mail: swlee@kitech.re.kr

환경 친화적인 기계가공 시스템과 가공기술 및 미세 가공 기술 개발에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

연삭유의 구입과 폐유 처리 비용은 제품 생산비의 약 15%정도를 차지하기 때문에 이와 같이 연삭유의 사용량을 줄이기 위한 가공기술은 가공 중에 발생하는 연삭유의 분진에 의한 작업장의 환경 오염을 방지하며, 폐유의 처리에서 발생하는 발암 물질에 의한 오염도 방지 할 수 있는 환경 친화적인 가공 기술일 뿐만 아니라 생산 단가를 줄일 수 있는 가공 기술이라 할 수 있다.

## 2. 환경친화 연삭 가공기술

### 2.1 대체냉각기술의 연구동향

연삭유가 금속 가공에 사용된 것은 1883년부터이며 연삭 정밀도를 향상시키기 위해서는 연삭유의 선진도 중요하다. 연삭유는 가공 점에서 발생하는 연삭 열을 냉각하는 냉각 효과와 스톨 입자와 공작물간의 마찰을 줄이고 스톨 표면에 막을 형성하여 열 경화된 칩이 스톨 표면에 잘 붙지 않도록 하는 윤활 효과 등이 있어서 가공 시 발생하는 칩의 열 경화에 의한 스톨의 눈막힘 현상을 방지하고 연삭 저항력을 줄인다. F. Taylor는 연삭 작업시 물을 공급하면 가공 속도를 건식 연삭보다 30~40%정도 증가 시킬 수 있다는 것을 발견했다. 이를 계기로 1951년 M. C. Shaw에 의하여 칩과 공구의 접촉면에서의 온도에 대한 연삭유 효과가 발표되었고, 1965년 H. S. Ramaiyengar는 금속 절삭에 있어서 칩 변형에 대한 연삭유 효과를 발표하였다.<sup>(4, 5)</sup>

그러나 최근 공작기계의 개발은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 고속화, 고정밀화, 복합화와 함께 저공해 가공 공정의 중요성이 크게 나타나고 있다. 이와 같이 산업분야에서 환경 문제가 큰 관심거리로 대두되면서 연삭유에 의한 환경 오염이 문제시 되고 있다. 연삭유는 윤활성, 냉각성, 세척성 등의 성질을 갖게 하기 위하여 염소(Cl), 유황(S), 인(P) 등의 물질을 함유하고 있다.

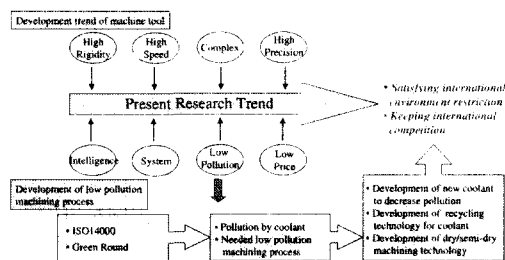


Fig. 1 Development trend of machine tool

이러한 첨가물들은 연삭 가공 중에 공기 중으로 미세하게 날려 작업환경을 악화시키고 작업자에 나쁜 영향을 미치며, 환경오염도 유발한다. 또한 사용한 연삭유를 소각 처리하는 과정에서도 이산화탄소와 다이옥신 등을 배출하게 되어 환경오염을 유발하고 처리비용도 많이 소요된다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 최근에는 연삭유를 사용하지 않는 건식 가공(dry machining)과 미량의 연삭유를 분무상태로 공급하는 세미건식가공(semi-dry machining) 및 극미량 연삭유만을 사용하는 가공기술(MQL, minimum quantity lubrication)과 같이 연삭유의 사용량을 줄이는 가공 기술과 사용한 연삭유를 재활용하는 기술 및 환경 친화적인 연삭유의 개발 등과 같은 연구가 진행되고 있다.<sup>(6, 7, 8, 9)</sup>

압축냉각공기에 의한 냉풍연삭은 本間宏之과 横川和珍에 의해 처음 발표되었으며 실제로 -25°C 이하의 압축냉각공기를 가공점에 충분히 공급함으로써 스톨과 공작물 사이의 접촉영역에서 냉각효과가 좋아져 공작물의 표면품질이 향상되는 것을 볼 수 있었다. 압축냉각공기를 이용하는 냉풍연삭의 경우 압축냉각공기를 가공 점에 공급하여 가공시 발생하는 열만을 줄여주면서 가공하는 방식으로 연삭유의 윤활 특성을 살릴 수 없었다. 냉풍연삭은 연삭유의 특성 중의 하나인 윤활 특성이 없기 때문에 윤활 특성을 얻기 위해서는 윤활성 물질을 코팅한 공구를 사용하거나 인체에 무해하고 생분해되는 윤활성 물질을 가공 점에 극 미량 공급하여 가공하는 방법등을 사용하기도 하였다. 또한, 윤활특성을 얻기 위하여 연삭유 극미량 공급장치(MQL, Minimum Quantity Lubrication)를 이용하는 경우와 연삭유를 Mist화 하여 가공 점에 공급하는 방법 등도 연구되고 있다.<sup>(10)</sup> 이러한 가공 기술은 가공물의 표면품질과 가공성능을 향상시킬 뿐만 아니라 연삭유 사용을 최소화함으로써 환경오염을 줄일 수 있다.

奥村成史 등은 냉풍 공기를 래진 본드 스톨(resin bonded wheel)과 비트리파이드 본드 스톨(vitrified bonded wheel)을 이용한 연삭 가공에 적용한 후 표면 거칠기와 연삭 저항력 등의 측정을 통하여 냉풍 공기를 이용한 연삭 가공이 연삭유를 사용하지 않고 가공할 수 있는 가공 방법중의 하나임을 확인하였다.<sup>(11)</sup>

국내에서도 압축냉각공기와 Mist를 이용한 환경 친화적 절삭과 연삭 가공기술의 연구가 진행되고 있다.<sup>(12, 13)</sup>

## 2.2 냉풍연삭실험

본 연구에서는 연삭시 가공물 표면의 온도측정, 가공력 측정 등을 통하여 연삭유, Mist 및 압축냉각공기의 냉각 효과 및 가공물의 표면품질에 미치는 영향을 알고자 하였다. 특히, 연삭유를 Mist 화하여 압축냉각공기와 함께 사용하는 가공방법을 제시하여 연삭 후 가공물의 표면 품질을 관찰함으로써 제안된 방법이 연삭유의 사용을 줄일 수 있는 가공방법 중의 하나로서 효과적임을 보이고자 하였다.<sup>(14, 15)</sup>

### 2.2.1 냉풍발생장치

냉풍연삭에 사용하기 위한 압축냉각공기를 얻기 위하여 직접 냉각방식의 향온조를 제작하였다. 제작되어진 향온조는 Fig. 2에 나타내었으며 냉각 능력은 상온 공기가 300ml/min으로 흐를 때 얻을 수 있는 압축냉각공기의 온도는 -35°C이다. 또한 2 pass 증발기 설치에 따른 1 pass 제상방법을 이용하여 항상 일정한 양의 압축냉각공기를 얻을 수 있도록 하였다. 열 교환 판의 성예를 제거하기 위한 제상시간 간격(drain time)을 설정하도록 되어 있는데 이 시간이 길 경우에는 압축냉각공기의 유량에 변화가 있어서 제상시간 간격을 "0"으로 맞추어서 실험을 하였다. 제상시간 간격이 "0"인 경우는 연속적으로 제상을 하기 때문에 향온조 출구 부분의 압축냉각공기의 유량 변화는 거의 없었다.

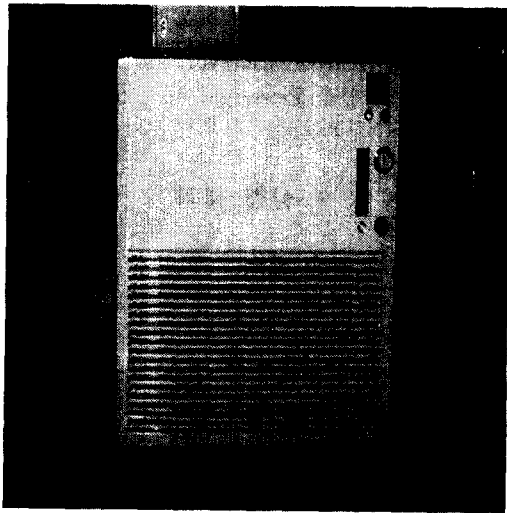


Fig. 2 Refrigerating System

Fig. 3 에는 제상시간 간격에 따른 출구 부분의 압축냉각공기의 온도를 시간에 따라 측정한 결과이다. 이 그림에서도 알 수 있듯이 시간에 따른 출구 부분의 압축냉각공기의 온도 변화 곡선은 비슷하게 나타났으며, 냉풍 발생장치의 냉각온도를 -35°C로 설정하여 압축공기를 냉각한지 10여분이 지나면 출구 부분의 압축냉각공기의 온도가 -35°C로 냉각되어짐을 알 수 있었다.

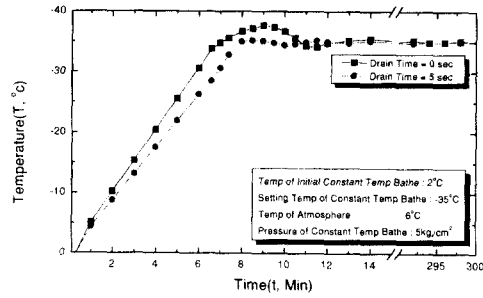


Fig. 3 Temperature of compressed cold air according to drain time

### 2.2.2 실험 장치

Fig. 4는 실험장치를 나타낸 그림이다. 장치구성은 공급된 압축공기의 습기제거를 위해 Air Dryer를 설치했고 향온조를 통해 미리 정해진 온도까지 압축공기가 냉각된다. 압축냉각공기는  $\phi 9.3\text{mm}$ 의 노즐을 사용해 가공 점에 직접 분사되며 Mist 발생을 위해서 압력차에 의해 연삭유가 공급되어지는 사이폰 방식의 노즐을 채택하였다.

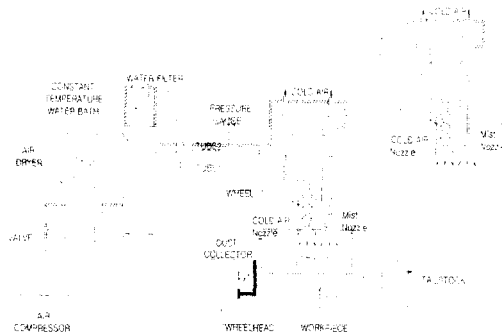


Fig. 4 Schematic of experimental equipment

노즐의 결빙을 방지하기 위하여 노즐 외부에서 공기와 연삭유가 혼합되는 외부 혼합방식 노즐을 사용하였으며, 스톨 아래에 집진기를 설치하여 냉풍연삭 시 발생하는 분진들을 제거하였다. 노즐에서는 10~24 μm의 입자를 만들어 내며, 냉풍발생장치는 공기 유량이 300ml/min으로 하여 약 5시간 동안 성능 실험을 한 결과 압축냉각공기의 온도가 -30±0.5°C로 거의 일정한 온도를 유지하였다.

2.2.3 실험 조건

Table 1은 냉풍연삭의 효과를 분석하기 위해서 압축냉각공기와 Mist를 이용한 연삭 실험조건을 나타낸 것이다. 실험에 사용된 스톨은 입자 크기가 180 μm인 알루미늄 스톨(WA80I/J7V)이며, 과가공 시편은 스펀들 샤프트(spindle shaft)용 재질인 SCM21을 사용하였다.

Table 1 Experimental conditions

Grinding Machine	Surface grinder Cylindrical grinding machine		
Grinding Wheel	WA80I/J7V, Ø <sub>o</sub> 305×325×Ø <sub>i</sub> 127		
Workpiece	SCM21	Carburizing and quenching, H <sub>RC</sub> 56~60	
	Coolant	Emulsion 4 %	
Grinding Fluids	Mist	Amount(ml/min)	100, 200
		Temperature(°C)	-30
Dressing Conditions	Dresser	One point diamond dresser	
	Depth of cut (a <sub>d</sub> , μm)	10	
	Feed rate (f <sub>d</sub> , mm/rev)	0.05	
Working Conditions	Depth of cut (a, μm/sec)	5, 10, 15, 20, 30	
	Wheel speed (v <sub>w</sub> , m/sec)	30, 35	
	Workpiece speed (v <sub>w</sub> , m/min)	18	

또한 압축냉각공기와 함께 공급하는 Mist의 영향을 알아보기 위해서 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 압축냉각공기를 가공 점에 분사하면서 Mist를 분사하는 4가지 위치에 따른 연삭 실험을 여 공작물의 표면 품질을 살펴보았다. Mist의 공급 위치에 따른 4가지의 실험 조건들은 다음과 같다.

- 스톨이 가공 점에 가기 전에 Mist를 스톨 표면에 분사
- 가공이 된 후의 공작물 표면에 Mist를 분사

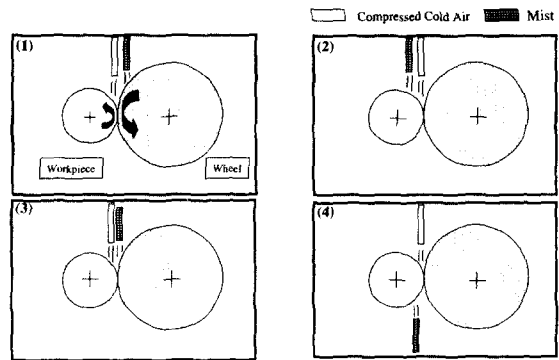


Fig. 5 Experimental methods according to mist supply position

- Mist를 압축냉각공기와 함께 가공 점에 직접 분사
- Mist를 가공 점 아래에서 가공되기 전의 공작물 표면에 분사

본 연구에서는 환경 친화적 가공기술로 제시된 압축냉각공기와 Mist의 냉각효과를 분석하기 위해서 가공 점에서 발생하여 연삭 열에 의한 공작물의 온도와 연삭력을 측정하여 공작물로의 에너지 유입비율을 계산하였고, 공작물의 표면 품질을 해석하기 위해서 표면 거칠기, 진원도 등을 측정하였다. 이를 위하여 가공 점에서의 연삭 열과 연삭력의 측정하기 위하여 사용 온도 범위가 -126°C~1260°C인 열전대(K-Type)를 시편내부에 부착한 가공용 시편을 Piezo-type의 공구동력계 위에 설치하고 실험하였다.

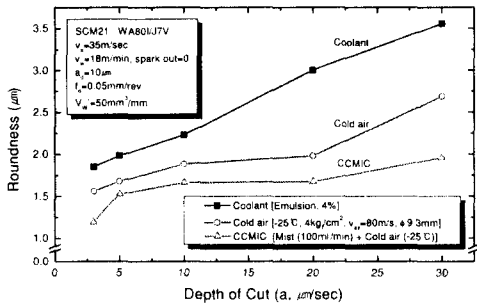
3. 실험 결과

3.1 가공물의 표면 품질

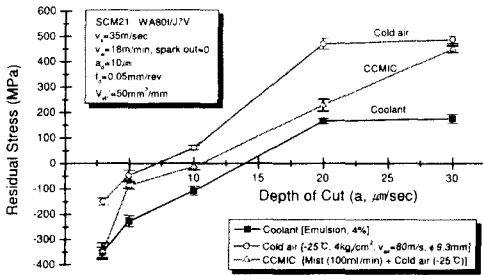
Fig. 6은 냉각 방법에 따른 가공물의 진원도와 가공 면의 잔류응력을 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)에 나타낸 것과 같이 진원도의 경우에는 연삭유를 이용하는 경우가 가장 나쁘게 나타났는데 이는 연삭유가 비압축성 유체이기 때문에 스톨의 주속도에 의해 가공 점으로 유입이 되면 순간적으로 고압이 발생하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 그러나 압축냉각공기를 이용하는 경우에는 노즐의 형상과 공급 방법에 따라 진원도의 값이 많이 차

이가 나므로 적정 조건을 선정하지 못하면 연삭유를 이용하는 경우보다 오히려 진원도가 나빠진다. 압축냉각공기와 Mist 를 같이 사용하는 경우에는 Mist 에 의한 윤활효과는 나타나지만 Mist 의 양이 적기 때문에 가공 점에 압력이 발생하지 않아서 가공 조건에 관계없이 항상 가장 좋은 진원도를 얻을 수 있었다.

Fig. 6(b)는 냉각 방법에 따른 가공 면의 잔류응력을 나타낸 그림이다. 연삭유를 사용하는 경우가 가장 냉각효과가 좋기 때문에 압축 잔류응력값이 크게 나타나지만, 압축냉각공기를 이용하는 경우에는 가공 점에서의 냉각 효과가 떨어져서 연삭열에 의한 열 응력이 발생하여 인장 잔류응력이 크게 나타났다. 그러나 연삭 깊이가 적은 경우에는 압축냉각공기를 이용하여도 압축 잔류응력을 얻을 수 있기 때문에 정삭 공정이나 정밀 연삭에 적용이 가능한 환경 친화적 가공 방법이라 할 수 있다.



(a) Roughness

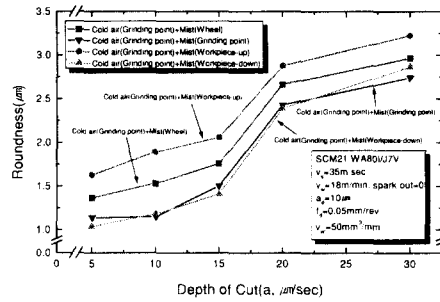


(b) Residual stress

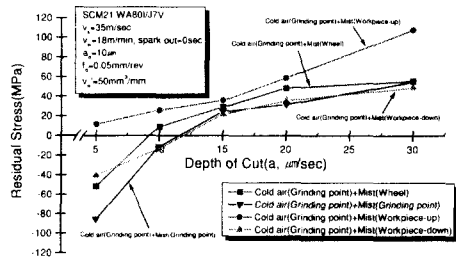
Fig. 6 Surface integrity of workpiece according to cooling methods

### 3.2 Mist 의 공급 방법에 따른 표면 품질

Fig. 7 은 Mist 의 분사 위치에 따른 가공물의 표면 품질을 나타낸 그림이다. Fig. 7(a)는 진원도를 나타낸 그림으로서 Mist 의 공급 위치가 가공 점 아래에서 가공 전의 공작물의 표면에 공급하는 경우와 가공 점에 압축냉각공기와 함께 공급하는 경우가 가장 좋았으며, 가공 후의 공작물 표면에 공급하는 경우가 가장 나쁘게 나타났다. Fig. 7(b)는 Mist 의 분사 방향에 따른 잔류응력을 나타낸 그림이다. Mist 를 가공 후의 공작물 표면에 분사하는 경우가 가장 큰 인장 응력을 나타내고 있는데 이는 가공 점에서 연삭유에 의한 윤활 효과가 적어서 가공 시에 발생하는 연삭 열이 가장 많이 발생할 뿐만 아니라 냉각 효과도 가장 나쁘다는 것을 의미한다. 연삭시 가공 점에서 발생하는 연삭열이 공작물로 전도되기 전에 냉각시켜 주지 않으면 공작물 표면에 열 응력이 발생하여 인장 응력이 발생하며, 열 응력이 발생한 가공 면을 Mist 로 냉각하여도 표면에 발생한 인장 응력은 없어지지 않는다. 따라서 고 품질 가공 면을 얻기 위해서는 연삭 열이 공작물로 전도되기 전에 냉각시켜 주어야 한다.



(a) Roughness



(b) Residual stress

Fig. 7 Influence of mist supply position on surface integrity

이상의 결과에서 알 수 있듯이 연삭유의 특징인 윤활 효과와 냉각 효과를 극대화하기 위해서는 Mist 화 되어 공급되는 연삭유가 가공 점에 원활히 공급이 되어 가공 시에 연삭유의 특성을 최대한 살릴 수 있도록 하여야 한다.

### 3.3 가공물의 에너지 유입 비율

연삭 가공중에 발생하는 연삭력과 가공물의 온도를 측정하여 가공물로의 에너지 유입 비율을 계산하였다. 슛들의 주속도가 35m/s, 연삭 깊이를 30 $\mu$ m로 하였을 때 연삭유를 이용하는 경우에는 가공물로의 에너지 유입비율이 28.83%로 가장 적었으며, 압축냉각공기와 Mist를 이용하는 경우가 31.04%, 그리고 압축냉각공기만을 이용하는 경우가 43.47%로 가공물로의 에너지 유입비율이 가장 많았다. 가공물로의 에너지 유입비율이 많다는 것은 가공 점에서의 냉각효과가 나빠서 가공 면에 열 응력의 발생이 크다는 것을 의미한다. 따라서 가공물로의 에너지 유입이 적도록 가공 조건을 선정하여야 한다.

Fig. 8에 나타내었듯이 슛들의 주속도를 30m/s로 하여 Mist를 사용하는 경우와 슛들의 주속도를 20m/s로 하여 연삭유를 이용하는 경우가 가공물로의 에너지 유입비율이 비슷함을 알 수 있다. 이와 같이 가공 조건을 적절히 선정함으로써 압축냉각공기와 Mist를 이용한 환경 친화 가공 기술을 가공 공정에 접목이 가능하다.

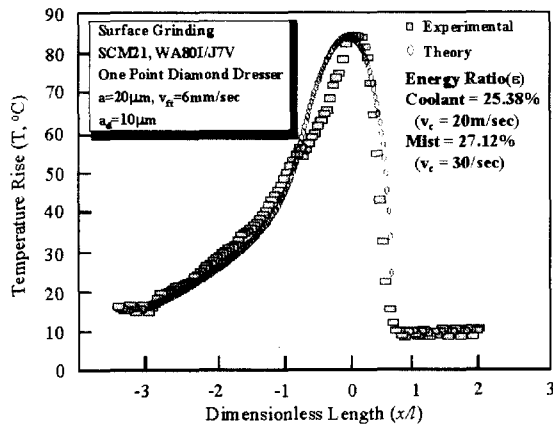


Fig. 8 Comparison of grinding temperature and analytical solution

## 4. 결론

압축냉각공기와 Mist를 이용한 연삭 가공기술은 연삭유의 사용에 의한 작업 시에 발생하는 분진에 의한 작업 환경의 오염 및 폐유 처리 시 오염을 줄일 수 있는 환경 친화적 가공 기술임을 알 수 있었다. 또한 Mist를 이용하는 경우에는 가공물의 진원도가 좋아지므로 정밀 연삭 뿐만 아니라 청정 연삭이 필요로 하는 가공 공정에도 적용이 가능하다. 또한 가공물로의 에너지 유입비율을 이용하여 비교하여 보았듯이 적절한 가공 조건을 선정함으로써 연삭유를 이용하는 경우와 거의 동일한 냉각효과도 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

1. H. Z. Choi, S. W. Lee, H. D. Jeong, "A comparison of the cooling effects of the compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with CBN wheel," Proceeding of AFDM, pp. 319-322, 1999.
2. H. Z. Choi, S. W. Lee, J. S. Ahn, "A study on the surface integrity for the cylindrical grinding with compressed cold air," ISAAT, pp. 187-192, 1998.
3. H. Z. Choi, S. W. Lee, J. S. Ahn, "A comparison of the cooling effects of the compressed cold air and coolant for the cylindrical grinding," International euspen conference, pp. 416-419, 1999.
4. M. C. Shaw, J. D. Pigott, "The Effect of the Cutting Fluid upon Chip-Tool Interface Temperature," ASME, pp. 45-56, 1951.
5. H. S. Ramaiyenger, "Some Effect of Cutting Fluids on Chip Formation in Metal Cutting," ASME, pp. 36-38, 1965.
6. H. Z. Choi, S. W. Lee, and J. S. Ahn, "A Study on the Surface Integrity for the Cylindrical Grinding with the Compressed Cold Air," The 2nd ISAAT, pp. 187-192, 1998.
7. H. Z. Choi, S. W. Lee, and H. D. Jeong, "A Comparison of the Cooling Effects of the Compressed Cold Air and Coolant for the Cylindrical Grinding with CBN Wheel," The 1st International Symposium on Advanced Forming and Die Manufacturing Technology(AFDM), pp. 315-318, 1999.
8. H. Z. Choi, S. W. Lee, D. J. Kim and H. D. Jeong,

"Grinding of Spindle Shaft Material with Mist Type Coolant," The 4th ISAAT, pp. 279-284, 2000.

9. 横川和珍, "研削油劑の用いない冷風研削技術の研究," 日本精密工學會誌, 1997.
10. G.Xiao, Malkin "On-line optimization for plunge grinding," Annals of the CIRP Vol. 45/1/1996.
11. 奥村成史, 横川和珍, 清水茂夫, 横川和珍, "公害防止のための研削油劑の用いないレジノイ砥石による冷風研削の研究," 砥粒加工學會學術 演會研究論文集, pp. 92-97, 1998.
12. 이석우, 최현중, 정해도, "WA 슷들을 이용한 원통 연삭시 압축냉각공기와 연삭유의 냉각효과에 관한 연구," KSPE, Vol. 17, No. 10, pp. 155-161, 2000.
13. 이종향, 조웅식, 정준기, 박철우, 김영중, "냉각공기에 의한 환경친화적 절삭가공기술," KSPE, Vol. 18, No. 6, pp. 114-120, 2001.
14. 横川和彦, 奥村成史, 清水茂夫, 横川宗彦, "公害防止のための冷風研削加工," 砥粒加工學會學術 講演會講演論文集, pp. 90-91, 1998.
15. 本間宏之, "公害防止のための研削油劑の用いないCBN冷風研削技術の研究," 日本精密工學會誌, 1996.